DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170212

赵丽, 杨家蘅, 李胜楠, 查菲娜, 远彤, 段剑钊, 朱云集. 不同穗型小麦品种小花发育成粒对氮肥的响应[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170212
Zhao L, Yang J H, Li S N,.Zha F N, Yuan T, Duan J Z. Response of florets development and grain formation in different spike wheat cultivars to nitrogen application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170212

不同穗型小麦品种小花发育成粒对氮肥的响应*

赵　丽[1], 杨家蘅[1], 李胜楠[1], 查菲娜[2], 远　彤[3], 段剑钊[1], 朱云集[1**]

(1. 河南农业大学农学院　郑州　450002; 2. 河南省气象局　郑州　450048; 3. 河南农业大学生命科学学院 郑州　450002)

摘　要: 为探索不同穗型小麦品种小花发育成粒对氮肥的响应，本试验以大穗型品种'周麦16'和多穗型品种'豫麦49'为供试材料，设置不同施氮水平0 kg(N)·hm^{-2}、180 kg(N)·hm^{-2}和360 kg(N)·hm^{-2}，观察分析了两个穗型小麦品种小花发育动态模式和结实特性。结果显示，随着生长度日(GDD)的增加，不同氮水平下2品种小花发育动态变化趋势相似，小花分化均符合二次曲线方程模式，退化和败育符合一次线性方程，R^2均达显著水平。大穗型品种'周麦16'小花分化总数显著高于多穗型品种'豫麦49'，在360 kg(N)·hm^{-2}差异极显著；大穗型品种'周麦16'表现出随施氮量增加，小花分化和退化速率提高，有利于可孕小花的形成、增加结实粒数，最终180 kg(N)·hm^{-2}结实粒数显著高于其他处理，较360 kg(N)·hm^{-2}平均每穗粒数增加了2.04粒；多穗型品种'豫麦49'尽管分化小花总量不高，但小花退化和可孕小花败育速率较低，在180 kg(N)·hm^{-2}施氮水平表现出高的可孕小花数量和结实粒数，但与高施氮处理相比差异不显著。表明就增加穗粒数而言，两品种均以180 kg(N)·hm^{-2}较为适宜，从最终产量及产量构成分析结果来看，'豫麦49'表现出与穗粒数相同的结果，而'周麦16'在高施氮条件下可通过增加成穗数和穗粒数提高产量。

关键词: 小麦; 氮水平; 穗型; 小花分化; 动态模式; 结实特性

中国分类号: S512.1+1　　**文献标识码:** A

Response of florets development and grain formation in different spike wheat cultivars to nitrogen application*

ZHAO Li[1], YANG Jiaheng[1], Li Shengnan[1], ZHA Feina[2], YUAN Tong[3], DUAN Jianzhao[1], ZHU Yunji[1**]

(1. College of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Meteorological Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450048, China; 3. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Wheat provides 20% of the calorie and protein consumed by humans. Further improvement in wheat yield potential is needed to meet future food demand. As yield is related to the number of grains, an understanding of the generation of grain is critical for increasing yield. Nitrogen is an important nutrient affecting the growth and development of wheat. Wheat yield is calculated as the number of grains per square meter, which in turn is related to the number of fertile florets at anthesis. In this study, the dynamics of floret generation and degeneration were studied in contrasting conditions of 0 kg·hm^{-2}, 180 kg·hm^{-2} and 360 kg·hm^{-2} of nitrogen (N). The modern, well-adapted large-spike wheat cultivar 'Zhoumai 16' and multi-spike wheat cultivar 'Yumai 49' were used at the materials. The results indicated that the dynamic characteristics of floret development of two cultivars were similar under different nitrogen applications with increasing degree-days (GDD). The dynamics of floret differentiation conformed to quadratic curve model. Besides, both floret degeneration and infertility conformed to linear equation. Moreover, the correlations were all significant. The large spike-cultivar 'Zhoumai 16' developed more florets than multi-spike cultivar'Yumai49', especially under nitrogen level of 180 kg(N)·hm^{-2}. For increased nitrogen application, large spike cultivar wheat 'Zhoumai 16' had more floret differentiation and faster floret differentiation and degeneration rates, which helped increase kernel number. This clearly indicated that the number of florets was not the only factor that determined grain number, hence there was need to place more focus on cultivation regulation at later stages of floret development. However, multi-spike cultivar 'Yumai49' had more floret differentiation and fertile spikelet under

* 国家自然科学基金项目(31571607)资助
**通讯作者: 朱云集, 主要从事小麦高产及营养调控研究。E-mail: hnndzyj@126.com
赵丽, 主要从事小麦高产栽培研究。E-mail: 379157630@qq.com
收稿日期: 2017-03-11　接受日期: 2017-06-06
* This study was founded by the National Natural Sciences Foundation of China (31571607).
**Corresponding author, E-mail: hnndzyj@126.com
Received Mar. 11, 2017; accepted Jun. 6, 2017

medium nitrogen level [180 kg(N)·hm^{-2}] than under low and high nitrogen levels. Although the total number of floret differentiation of multi-spike cultivar 'Yumai49' was less than that of large-spike cultivar 'Zhoumai16', the degeneration and infertility rates were rather low. Compared with multi-spike cultivar wheat, the 1000-kernel weight of large-spike cultivar was highest for three different nitrogen levels. Under the experimental condition, yield of two-spike cultivar wheat peaked under 180 kg(N)·hm^{-2}. It was concluded that 180 kg(N)·hm^{-2} increased kernel number of different spike cultivars. However, yield of large-spike cultivar 'Zhoumai 16' improved by increased spike and grain number under high nitrogen rate.

Keywords: Wheat; Nitrogen level; Spike type; Floret development; Dynamic model; Grain setting characteristics

小麦(*Triticum aestivum* L.)是我国主要粮食作物之一，在当前耕地和水资源短缺的形势下，小麦产量稳定增加对提高人民生活水平、保障国家粮食安全具有重要意义[1]。小麦产量提高是需要构成因素之间协调发展，但穗粒数不足是限制小麦产量提高的一个重要因素[2-3]。有研究指出幼穗发育进程是影响穗粒数的关键因素[4]，但由于小花分化时间长、分化数量多而且退化数量多，成为制约穗粒数增加的瓶颈问题，因此不少研究进一步关注到小花原基分化的阶段性特征及其调控因素[5-7]。崔金梅等[1]根据小花的发育进程与生态条件的关系，首次将小花发育过程划分为小花原基分化期、雌雄蕊原基分化期、小凹期、凹期、大凹期、柱头突起期、柱头伸长期、柱头羽毛突起期、柱头羽毛伸长期和柱头羽毛形成期 10 个时期。小麦小花原基的分化受到多种因素的影响，如温光条件、营养器官的生长状况和调控措施等，其中氮素是影响小麦生长发育的重要营养元素，氮肥施用对提高小麦小花分化数量、减少小花退化及提高最终结实粒数有较大影响[8-10]。王祎等[11]研究表明，施氮量对小麦小穗的中部小花发育、总小穗数、不孕小穗数和单穗的结实率影响均一致。由于小麦生产中所利用的品种类型较多，不同穗型品种最终穗粒数差异较大[12]。王兆龙等[13]研究指出，不同穗型小麦表现为穗型越大，小花分化速率和每穗分化小花数越多，由此形成的可孕小花数和结实粒数最多，不同穗型小麦在强势位小花上的结实特性差异小，但在弱势位小花上的结实特性差异较大。小麦小花发育可分为小花分化、退化和可孕小花败育过程，但施氮对不同穗型小花发育不同阶段影响的研究较少。为此，本试验开展对不同穗型品种小花发育成粒对氮肥响应的研究，以期为在小麦生产中采用不同穗型小麦品种提高穗粒数、稳定提高产量的技术制定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2015—2016 在河南农业大学科教示范园区进行田间试验，试验田土壤质地为壤土，0~20 cm 土层有机质含量为 16.2 g·kg^{-1}，全氮为 1.00 g·kg^{-1}，碱解氮为 119 mg·kg^{-1}，速效磷为 19.1 mg·kg^{-1}，速效钾为 97 mg·kg^{-1}。播前每公顷施磷肥(过磷酸钙)150 kg，钾肥(KCL)150 kg，氮肥(尿素,含 N 46%)50%基施，50%返青期追施。

以大穗型小麦品种'周麦 16'(V_1)和多穗型小麦品种'豫麦 49'(V_2)为供试材料。'周麦 16'和'豫麦 49'穗均为纺锤型；'周麦 16'平均每公顷穗数约 555 万，穗粒数约 38 粒，千粒重约 46 g，而'豫麦 49'每公顷成穗数约 645 万，穗粒数约 31.0 粒，千粒重约 40.9 g[14]。

随机区组试验，设置 3 个氮水平分别为 0 kg·hm^{-2}(N_1)、180 kg·hm^{-2}(N_2)、360 kg·hm^{-2}(N_3)，设 4 次重复，小区面积为 2.9 m×7 m^2，于 10 月 8 日播种，基本苗为每公顷 2.25×10^6 株。

1.2 测定内容与方法

从小麦基部节间开始伸长，节间露出地面 1.5~2.0 cm 的农艺拔节期开始到开花后 5 d 小花分化结束，每 7 d 取样 1 次，每小区取长势均匀一致的小麦植株 5 株。在 EMZ-TA 解剖镜下观测幼穗发育进程，观察并记载单茎小穗数、分化小花数(以拔节后 28 d 小花分化的最高峰期计算)、可孕小花数(具有雄蕊、雌蕊、子房、柱头和柱头羽毛的小花)及各阶段小花发育进程，并最终计算每平米的数量。成熟期取 20 株进行考种，记载其小穗数、每穗穗粒数和千粒重，并实收 6 m^2 进行计产。根据观察结果和考种数据计算每平方米分化小花数(拔节后 21 d)、每平方米可孕小花数(拔节后 28 d)、单位面积结实粒数(成熟期)、小花结实率(%)和可孕小花结实率(%)。根据当地气象资料计算累积生长度日(GDD)，衡量小花发育的积累热量。

$$GDD=\sum[(T\max+T\min)/2-Tb] \quad (1)$$

式中: Tmax 为 1 天的最高温度(F), Tmin 为 1 天的最低温度(F), Tb 为作物发育基点温度。

1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件和 Spass 19.0 软件对试验数据进行作图和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对不同穗型小麦品种小花分化、退化及败育的影响

由图 1 分析可知，在不同的施氮水平下，随着播后累积生长度日的增加，两个品种小花发育经历由快到慢的分化阶段、迅速下降的退化阶段和缓慢下降的败育阶段，其中分化阶段符合二次曲线方程，退化和败育符合一次线性方程(表 1)，R^2 均达显著水平，3 种施氮水平下两种穗型小麦品种在分化阶段均符合二次曲线方程 y=–0.970 8x^2+2 839.9x-2E+06(R^2=0.820 9)，退化阶段符合一次线性方程 y=–484.51x+781 833(R^2=0.483 8)。败育阶段小花个数变化较小，趋于稳定，表明播后累积生长度日对不同施氮水平下小麦小花分化有明显影响。进一步分析可知，不同穗型品种在不同氮水平下小花分化、退化和败育的动态变化有所不同，在小花的分化阶段，两个品种均为 N_1 条件下分化快于 N_2 和 N_3，相比多穗型品种 V_2，大穗型品种 V_1 在 N_2 和 N_3 水平下小花分化的起始时间晚，但进入小花分化高峰早且高峰时期相对较长，有利于上位小花的发育，为大穗奠定基础。进入到可孕小花败育阶段，两个品种在 N_2 和 N_3 水平下败育速率基本恒定，小花数缓慢下降。可以看出两个穗型小麦品种小花分化对施氮量的敏感度不一样，同时也表明大穗型品种具有小花分化数量多的优势。

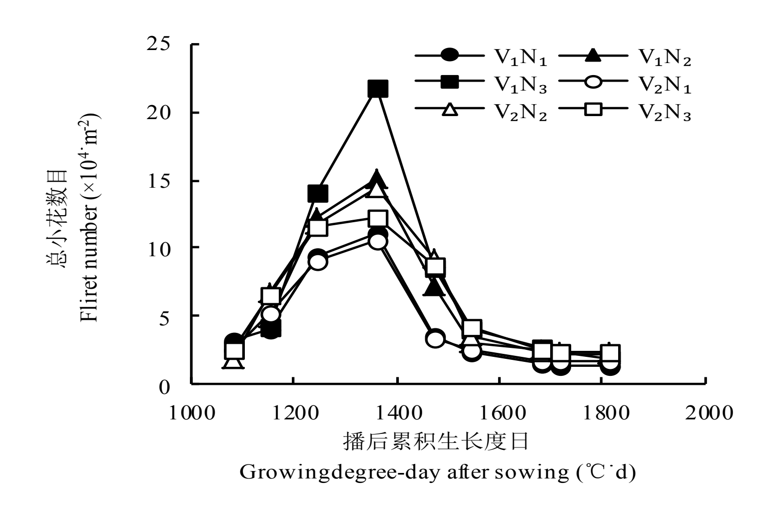


图 1　不同氮水平下不同小麦品种小花分化、退化及败育随播后累积生长度日的变化

Fig. 1　The change of differentiation, degeneration and infertility of florets of different wheat varieties under different nitrogen levels

V_1: 周麦 16 Zhoumai 16; V_2: 豫麦 49 Yumai 49; N_1: 施氮量 0 kg·hm^{-2}; N_2: 施氮量 180 kg·hm^{-2}; N_3: 施氮量 360 kg·hm^{-2}。V_1: Zhoumai 16; V_2: Yumai 49; N_1: nitrogen application rate is 0 kg·hm^{-2}; N_2: nitrogen application rate is 180 kg·hm^{-2}; N_3: nitrogen application rate is 360 kg·hm^{-2}.

表 1　不同施氮水平小麦品种单位面积小花分化、退化及败育的模式方程

Table 1　The equations of floret differentiation, degeneration and infertility per unit area of different varieties of wheat under different nitrogen levels

处理 Treatment	小花发育 Floret development	方程 Equation	R^2
V_1N_1	分化 Differentiation	y=–0.357 4x^2+1 191x–844 591	0.931 4**
	退化 Degeneration	y=–487.61x+768 840	0.920 7**
	败育 Infertility	y=–45.354x+93 143	0.852 9**
V_1N_2	分化 Differentiation	y=–1.488 2x^2+4 226.2x–3E+06	0.987 5**
	退化 Degeneration	y=–650.51x+1E+06	0.998 2**
	败育 Infertility	y=–34.001x+82 847	0.879 8**
V_1N_3	分化 Differentiation	y=–0.247 7x^2+1 417.9x–1E+06	0.987 5**
	退化 Degeneration	y=–974.61x+2E+06	0.977 9**
	败育 Infertility	y=–82.899x+167 366	0.978 4**
V_2N_1	分化 Differentiation	y=–0.791 1x^2+2 231.2x–1E+06	0.988**
	退化 Degeneration	y=–450.88x+713 002	0.907 8**
	败育 Infertility	y=–32.247x+73 949	0.790 6**
V_2N_2	分化 Differentiation	y=–1.300 7x^2+3 629.2x–2E+06	0.998 9**
	退化 Degeneration	y=–571.96x+925 383	0.972 7**
	败育 Infertility	y=–41.966x+97 930	0.764 4**

V_2N_3	分化 Differentiation	y=−1.629 5x^2+4 343.7x−3E+06	0.989 8**
	退化 Degeneration	y=−422.02x+700 017	0.952 7**
	败育 Infertility	y=−72.209x+150 599	0.846 3**

X: 播后累积生长度日(GDD); *Y*: 小花数量。分化起始时间: 1 082.8~1 360.2 ℃·d; 退化起始时间: 1 360.2~1 545.7℃·d; 败育起始时间: 1 545.2~1813.6 ℃·d。V_1: 周麦 16 Zhoumai 16; V_2: 豫麦 49 Yumai 49; N_1: 施氮量 0 kg·hm^{-2}; N_2: 施氮量 180 kg·hm^{-2}; N_3: 施氮量 360 kg·hm^{-2}。*X*: growing degree-day (GDD); *Y*: florets number. Time of differentiation is 1082.8~1360.2 ℃·d; time of degeneration is 1 360.2~1545.7 ℃·d; time of infertility is1 545.2~1813.6 ℃·d. V_1: Zhoumai 16; V_2: Yumai 49; N_1: nitrogen application rate is 0 kg·hm^{-2}; N_2: nitrogen application rate is 180 kg·hm^{-2}; N_3: nitrogen application rate is 360 kg·hm^{-2}.

2.2 不同施氮水平下不同穗型品种小麦分化小花数、可孕小花数和结实粒数的差异

图 2 显示，两穗型品种在不同施氮水平下小花分化数量差异显著，大穗型品种 V_1 在 3 种施氮水平下小花分化数量均高于多穗型品种 V_2，尤其在 N_3 水平下差异达极显著，每平方米总小花数比 V_2 多 95 212 个，随着施氮量的增加大穗型品种总小花数呈现出递增趋势；多穗型品种总小花数呈现出先增后减的趋势。两品种可孕小花数量均随着施氮量的增加而增加，相同氮水平下大穗型品种小花的分化数量虽然明显高于多穗型品种，但败育后两品种小花数量差异不大。在最终的结实粒数上，大穗型在不同氮肥处理下，每平方米分别是 13 294.23 个(V_1N_1)、18 191.74 个(V_1N_2)和 19 577.52 个(V_1N_3)，表现出随施氮量增多结实粒数提高的趋势，但 V_2N_1、V_2N_2 和 V_2N_3 分别是 14 382.39 个、19 263 个和 17 897.34 个，表现出先增后减的趋势，表明增施氮肥有利于大穗型小麦小花分化和穗粒数的形成。

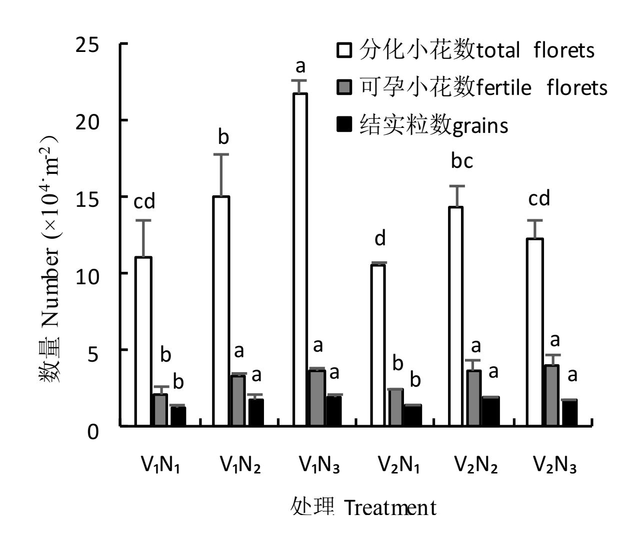


图 2 不同施氮水平不同小麦品种分化小花数、可孕小花数和结实粒数的差异

Fig. 2 The difference in total florets, fertile florets and grains of different varieties of wheat under different nitrogen levels

V_1: 周麦 16 Zhoumai 16; V_2: 豫麦 49 Yumai 49; N_1: 施氮量 0 kg·hm^{-2}; N_2: 施氮量 180 kg·hm^{-2}; N_3: 施氮量 360 kg·hm^{-2}。不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著。V_1: Zhoumai 16; V_2: Yumai 49; N_1: nitrogen application rate is 0 kg·hm^{-2}; N_2: nitrogen application rate is 180 kg·hm^{-2}; N_3: nitrogen application rate is 360 kg·hm^{-2}. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same index.

2.3 不同施氮水平对不同穗型小麦品种小花分化、退化和败育速率的影响

由图 2 可以看出，两品种分化起始速率基本相等，分化小花个数 800 个·m^{-2}·GDD^{-1} 左右，且 V_1N_1 起始分化速率低于其他氮水平，V_1N_2 和 V_1N_3 在各个 GDD 值下小花分化速率均高于其他处理。在小花的退化阶段，V_1 在各氮水平下小花退化速率均高于 V_2，在 N_3 水平下两品种退化速率差异最显著；大穗型品种 V_1 小花退化速率是随着施氮水平的增加而增加，而多穗型品种 V_2 小花退化速率是随着施氮水平的增加呈现出先增后降的趋势。在可孕小花的败育阶段，两品种均在最高氮水平下败育率最高，V_1N_3 的可孕小花败育率是 82.90 个·m^{-2}·GDD^{-1}，V_2N_3 的可孕小花败育率是 72.209 个·m^{-2}·GDD^{-1}。由此可见，在本试验范围内，大穗型品种小麦小花分化量均显著高于多穗型品种，但退化速率也显著高于多穗型品种，说明大穗型品种小麦的小花分化能力比较强，同时小花退化率也高，多穗型品种小花分化量较少，但小花退化率低，可孕小花败育率也显著低于大穗型品种。两品种在最高施氮量 N_3 条件下均表现出高的败育率，表明在本试验条件下，增加施氮量对减少可孕小花败育率作用较小。

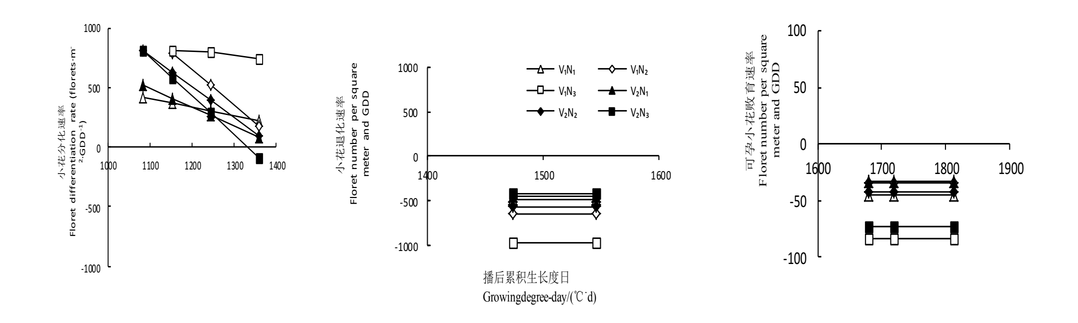


图 3　不同施氮水平不同小麦品种小花原基分化速率、退化速率和败育速率

Fig. 3　The differentiation rate, degeneration rate and infertility rate of floret primordial of different varieties of wheat under different nitrogen levels

V_1: 周麦 16 Zhoumai 16; V_2: 豫麦 49 Yumai 49; N_1: 施氮量 0 kg·hm^{-2}; N_2: 施氮量 180 kg·hm^{-2}; N_3: 施氮量 360 kg·hm^{-2}。V_1: Zhoumai 16; V_2: Yumai 49; N_1: nitrogen application rate is 0 kg·hm^{-2}; N_2: nitrogen application rate is 180 kg·hm^{-2}; N_3: nitrogen application rate is 360 kg·hm^{-2}.

2.4　不同施氮水平下不同穗型品种小花结实率、可孕小花结实率和小穗结实率的差异

由图 3 分析可知，大穗型品种 V_1 的小花结实率、可孕小花结实率和小穗结实率均随着施氮水平的增加呈现降低趋势；多穗型品种 V_2 的可孕小花结实率和小穗结实率随着施氮水平的增加而降低，而小花结实率随着施氮水平的增加而提高。V_2 在 3 个氮水平下小花结实率均显著高于 V_1，尤其在 N_3 水平下差异更为显著，而 V_2 的可孕小花结实率和小穗结实率在各个氮水平下均低于 V_1。由此可知，大穗型品种小麦的小花分化数量虽然多，但退化的数量也比较多，导致小花结实率比较低。

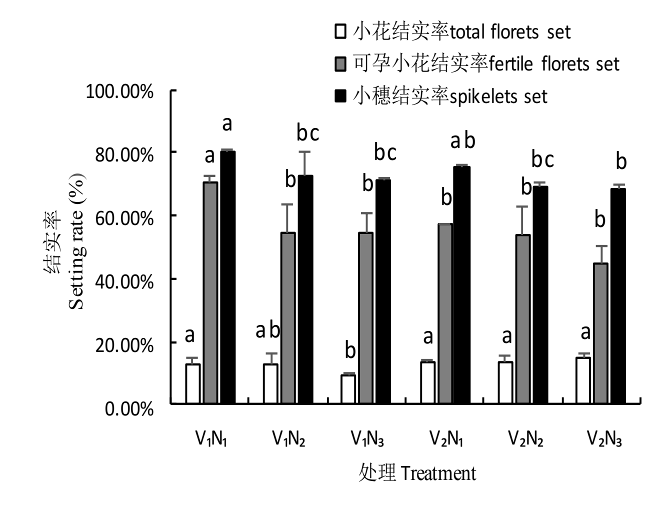


图 4　不同施氮水平不同小麦品种小花数结实率、可孕小花结实率和小穗结实率的差异

Fig. 4　Total florets set, fertile florets set and spikelets set of different varieties of wheat under different nitrogen levels

V_1: 周麦 16 Zhoumai 16; V_2: 豫麦 49 Yumai 49; N_1: 施氮量 0 kg·hm^{-2}; N_2: 施氮量 180 kg·hm^{-2}; N_3: 施氮量 360 kg·hm^{-2}。不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著。V_1: Zhoumai 16; V_2: Yumai 49; N_1: nitrogen application rate is 0 kg·hm^{-2}; N_2: nitrogen application rate is 180 kg·hm^{-2}; N_3: nitrogen application rate is 360 kg·hm^{-2}. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same index.

2.5　施氮水平对不同穗型小麦品种产量及其构成的影响

由表 2 分析可知，两品种成穗数相比，在 N_1 条件下 V_1 和 V_2 的穗数差异性显著，N_2 和 N_3 条件下的穗数差异均不显著。两品种千粒重均表现出 $N_1>N_2>N_3$ 的趋势，N_1 条件下千粒重显著高于其他两个施氮处理，且 N1 处理的差异较 N_2 和 N_3 显著。大穗型品种 V_1 和多穗型品种 V_2 的穗粒数随施氮水平的增加呈现出先增后减的趋势，但 V_1 在各个氮水平下穗粒数均多于 V_2。在 N_2 和 N_3 水平下 V_1 的产量要高于 V_2，表现出大穗型品种的产量潜力，产量表现趋势与穗粒数相同，两种穗型小麦品种在中等施氮量均表现出最高产量。表明在本试验条件下，中等施氮量即能保证小麦产量构成因素的协调发展而提高产量。

表 2　施氮水平对小麦产量及其构成的影响

Table 2　Effects of different nitrogen levels on grain yield of different varieties of wheat

处理 Treatment	穗数 Number of spikes (×10^3·hm^{-2})	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})

V_1N_1	3 827.60±307.44d	35.7±3.70b	55.48±0.01a	7 477.80±650.54b
V_1N_2	4 837.84±340.41bc	39.78±6.74a	51.45±0.60bc	8 788.14±415.14a
V_1N_3	5 438.26±529.61ab	37.74±1.92b	50.39±0.73c	8 520.03±396.21a
V_2N_1	4 686.86±43.92c	30.23±0.11b	53.15±1.52b	7 686.70±9.43b
V_2N_2	5 997.27±532.84a	32.12±0.81a	46.02±2.25d	8 434.49±166.68a
V_2N_3	5 597.00±411.14a	31.97±0.17a	45.77±1.26d	7 474.56±858.02b

V_1: 周麦 16 Zhoumai 16; V_2: 豫麦 49 Yumai 49; N_1: 施氮量 0 kg·hm^{-2}; N_2: 施氮量 180 kg·hm^{-2}; N_3: 施氮量 360 kg·hm^{-2}。不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著。V_1: Zhoumai 16; V_2: Yumai 49; N_1: nitrogen application rate is 0 kg·hm^{-2}; N_2: nitrogen application rate is 180 kg·hm^{-2}; N_3: nitrogen application rate is 360 kg·hm^{-2}. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same index.

3 讨论与结论

就我国黄淮南片的小麦生产情况来看，每公顷成穗数 600 万左右，千粒重一般均达到了 40 g 以上，但穗粒数只有 30 粒左右[15]，穗粒数少成为制约小麦产量提高的一个主要因素。有研究指出，提高穗粒数的途径主要靠增加小穗数和小花数[15]，但我国黄淮麦区小麦小穗发育的二棱期即越冬期较长，一般分化小穗数较多，而且每穗可分化小花原基 150~180 个，但大部分小花(70%)在小花退化阶段发育停止，仅有少部分小花发育成为可孕小花[16]，课题组先前的研究也指出：可孕小花是成粒的骨干小花，但在其成粒过程中仍有 30%以上的败育率[1]，因此穗粒数亦需减少可孕小花的败育，才能提高结实率。González 等[17]研究指出，小花的生存对小麦穗粒数的形成起着决定性的作用，并且这个过程可能受到资源有效性的调节。在小麦小花分化至可孕小花败育阶段时值其营养生长快速生长阶段，小花结实特性受环境条件和基因型的共同影响[18]。由此可知，合理的生长条件与营养供应，对减少小花退化和可孕小花败育增加穗粒数是有益的。

李存东等[19]曾研究了冬春性品种小花发育与播后生长度日的关系，指出用上升曲线、速降和缓降直线能准确完整地反映小麦正常幼穗发育、小花分化、退化与败育的动态过程，但对其 3 个过程的调控尚不清楚。本试验结果表明了大穗型和多穗型品种在不同施氮水平下的小花分化、退化与可孕小花败育的动态模式，而且还可看出不同穗型品种对氮肥的响应有差异，增加施氮量可提高大穗型品种的小花分化量，但同时也增大了小花退化速率，因此对其小花结实率提高作用不大；对多穗型品种来说，小花分化数量对施氮量增加不敏感，但可降低其小花退化速率。虽然大穗型品种小麦小花退化速率比多穗型小麦品种要高，但由于分化的总小穗和总小花数多，可孕小花和小穗结实量相对较高是大穗型小麦品种获得穗粒数较多的重要原因。两品种在高施氮量条件下均表现出高的可孕小花败育率，这表明可孕小花发育成粒不仅由遗传特性所致，也受作物生长条件的影响，启发我们在小麦生产中，可采用适宜施氮量降低小花的分化量和可孕小花的败育速率。

关于小麦适宜施氮量的研究较多，传统生产中施氮量的确定多以产量目标而定，郝代成、李欢欢等[20-21]研究结果表明，在河南小麦高产条件下氮水平为 180~270 kg·hm^{-2} 对小麦物质生产积累、转运与产量形成较为有利。武金果[22]利用河南省测土配方施肥数据分析得知，河南省大部分地区小麦适宜施氮量在 150~200 kg·hm^{-2}。根据本研究结果，就施氮量对小麦小花发育与成粒的影响来说，180 kg·hm^{-2} 均能满足 2 种穗型小麦品种形成穗粒数对小花数量的需求，尽管大穗型品种每平米小花数随施氮量增多有提高的趋势，但最终成粒数两品种均以 180 kg·hm^{-2} 最高，其中大穗型品种 180 kg·hm^{-2} 显著高于 360 kg·hm^{-2}。从最终产量及产量构成分析结果来看，‘豫麦 49’表现出与穗粒数相同的结果，而‘周麦 16’在增施氮肥条件下可通过增加成穗数和穗粒数提高产量。T.R. Sinclair 和 P.D. Jamieson[23]通过研究开花期穗中氮含量与粒数的关系，得出花期小麦穗中积累的氮含量高低与粒数呈高度相关性，可以设想适当推迟追氮时期，满足小麦在可孕小花败育阶段的营养供应，对两种穗型品种减少可孕小花败育率增加穗粒数也是可行的，在以后的研究中应当借鉴。关于不同穗型品种小花发育成粒对 N 肥响应的生理机制还有待进一步研究。

参考文献 References

[1] 崔金梅，郭天财，朱云集，等. 小麦的穗[M]. 北京：中国农业出版社，2008: 5

Cui J M, Guo T C, Zhu Y J, et al. Spike of Wheat[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 5

[2] Fischer R A. Wheat physiology: A review of recent developments[J]. Crop and Pasture Science, 2011, 62(2): 95–114

[3] Ferrante A, Savin R, Slafer G A. Floret development and grain setting differences between modern durum wheat under contrasting nitrogen availability[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(1): 169–184

[4] 崔金梅，王化岑，刘万代，等. 冬小麦籽粒形成与幼穗发育的关系研究[J]. 麦类作物学报，2007, 27(4): 682–686

Cui J M, Wang H C, Liu W D, et al. Relationship between grain formation and young spike development of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(4): 682–686

[5] González F G, Miralles D J, Slafer G A. Wheat floret survival as related to pre-anthesis spike growth[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14): 4889–4901

[6] Ghiglione H O, Gonzalez F G, Serrago R, et al. Autophagy regulated by day length determines the number of fertile florets in wheat[J]. The Plant Journal, 2008, 55(6): 1010–1024
[7] Reynolds M, Bonnett D, Chapman S C, et al. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(2): 439–452
[8] 李文军, 杨晓云, 颜晓元. 施氮和肥料添加剂对太湖地区小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 702–707
Li W J, Yang X Y, Yan X Y. Effects of nitrogen and fertilizer additive application on wheat yield and nitrogen accumulation and utilization in Taihu Lake Region[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(4): 702–707
[9] 王芳, 赵玉兰, 孔丽红. 氮素运筹对小麦产量及产量构成因素的影响[J]. 山西农业科学, 2010, 38(4): 30–32
Wang F, Zhao Y L, Kong L H. Effect of nitrogen management to yield and yield component factors in wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(4): 30–32
[10] 孔令聪, 曹承富, 汪芝寿, 等. 砂姜黑土长期施肥对小麦生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 76–78
Kong L C, Cao C F, Wang Z S, et al. Effects of long-term located fertilization on wheat growth in shajiang black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 76–78
[11] 王祎, 李青松, 王宜伦, 等. 施氮量对小麦穗花发育及穗粒数的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(5): 668–673
Wang Y, Li Q S, Wang Y L, et al. Effect of amount nitrogen applied on young spike development and kernel number of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(5): 668–673
[12] 王彦丽, 邱喜阳, 朱云集, 等. 施氮量和施氮时期对冬小麦幼穗小花发育及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(7): 82–87
Wang Y L, Qiu X Y, Zhu Y J, et al. Effection of rate and period of nitrogen application on the floret development and grain yield of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(7): 82–87
[13] 王兆龙, 曹卫星, 戴廷波, 等. 不同穗型小麦品种小花发育与结实特性研究[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(4): 9–12
Wang Z L, Cao W X, Dai T B, et al. Characteristics of floret development and grain set in three wheat genotypes of different spike sizes[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2000, 23(4): 9–12
[14] 朱云集, 郭天财, 谢迎新, 等. 施用不同种类硫肥对豫麦 49 产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(2): 293–297
Zhu Y J, Guo T C, Xie Y X, et al. Effects of different sulphur fertilizers on yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar Yumai 49[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(2): 293–297
[15] 朱云集, 崔金梅, 郭天财, 等. 河南省小麦生产发展中几个关键技术问题的商榷[J]. 河南农业科学, 2011, 40(8): 54–57
Zhu Y J, Cui J M, Guo T C, et al. Discussion of key technique problems in development of wheat production in Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(8): 54–57
[16] Miralles D J, Katz S D, Colloca A, et al. Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height[J]. Field Crops Research, 1998, 59(1): 21–30
[17] González F G, Slafer G A, Miralles D J. Floret development and survival in wheat plants exposed to contrasting photoperiod and radiation environments during stem elongation[J]. Functional Plant Biology, 2005, 32(3): 189–197
[18] Chen Y, Yuan L P, Wang X H, et al. Relationship between grain yield and leaf photosynthetic rate in super hybrid rice[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2007, 33(3): 235–243
[19] 李存东, 曹卫星, 戴廷波, 等. 小麦小花原基分化和退化的动态模式与特征[J]. 中国农业科学, 1999, 32(5): 98–100
Li C D, Cao W X, Dai T B, et al. Study on dynamic models and characteristics of floret primordium differentiation and degeneration in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(5): 98–100
[20] 郝代成, 高国华, 朱云集, 等. 施氮量对超高产冬小麦花后光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 346–352
Hao D C, Gao G H, Zhu Y J, et al. Effects of nitrogen application rate on photosynthesis characteristics after anthesis and high grain yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(2): 346–352
[21] 李欢欢, 黄玉芳, 王玲敏, 等. 河南省小麦生产与肥料施用状况[J]. 作物学通报, 2009, 25(18): 426–430
Li H H, Huang Y F, Wang L M, et al. Wheat production and fertilizers application in Henan province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(18): 426–430
[22] 武金果. 河南省小麦施肥技术参数研究[J]. 中国农技推广, 2013, 29(12): 35–37
Wu J G. Study on the technical parameter of Wheat fertilization in Henan Province[J]. China Agricultural Technology Extension, 2013, 29(12): 35–37
[23] Sinclair T R, Jamieson P D. Grain number, wheat yield, and bottling beer: An analysis[J]. Field Crops Research, 2008, 98(1): 60–67